

液晶デバイス設計に必要な各種パラメータの高精度測定法に関する研究

著者	大野 友嗣
号	53
学位授与番号	4116
URL	http://hdl.handle.net/10097/42530

氏名	おおの ゆうじ		
大野 友嗣			
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成21年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 電子工学専攻		
学位論文題目	液晶デバイス設計に必要な各種パラメータの高精度測定法 に関する研究		
指導教員	東北大学教授 内田 龍男		
論文審査委員	主査	東北大学教授 内田 龍男	東北大学教授 川又 政征
		東北大学教授 枝松 圭一	東北大学准教授 宮下 哲哉

論文内容要旨

第1章 序論

液晶ディスプレイ(LCD)は偏光子、カラーフィルタ、液晶、バックライト等から構成されており、液晶の複屈折性を利用し、偏光の状態を制御することによって画像の表示を行うデバイスである。これらのうち液晶はLCDの電気光学特性に関わる重要な要素である。液晶セルの光学特性は、液晶材料の屈折率、液晶セル厚および液晶の配向分布によって決定される。ここで、配向分布の理論値は弾性連続体理論に基づいて算出することができ、このためには弾性定数、誘電率等多くの液晶材料パラメータおよび液晶デバイスパラメータが必要である。現在、これらのパラメータの値を用いた配向分布計算および光学シミュレーションに基づいてLCDの光学設計が行われている。しかし、従来の各パラメータ測定法には種々の問題点が存在し、高精度測定が困難であった。このことから、従来LCDの光学特性において実測値と設計値とが一致せず、LCDの定量評価技術は未確立であった。この結果、LCDを実現するためには試行錯誤の繰り返しによる調整が必要となり、多くの問題が生じていた。したがってLCDの電気光学特性に関わる各種パラメータの高精度測定が求められてきており、高精度測定法の確立は重要な課題である。

本研究では、高精度測定に有望なエリプソメトリーに注目し、精密なLCD設計のためのエリプソメトリーを用いた各種パラメータの高精度測定の実現を目指し、正確な光学異方性の計算理論の確立、エリプソメトリーを用いた液晶パラメータ測定理論の確立、そしてこれらを応用した各種パラメータの高精度測定法の確立を行った。

第2章 光学的干渉の計算の有無を選択可能な新光学異方性計算理論の確立

エリプソメトリーは実測値と理論値とのフィッティングから各種パラメータの算出を行う方法であることから、正確な理論値を計算する必要がある。LCDは様々な厚みをもつ材料で構成されており、光を入射させると光学的干渉が生じる層と生じない層が存在するが、多層媒体の光学異方性計算において層毎の干渉計算の有無を選択可能な計算理論が存在しなかった。したがって、層毎の干渉計算の有無を選択可能な光学異方性の新計算理論を構築することが重要な課題であり、検討を行った。

従来の光学異方性計算理論である拡張ジョーンズ行列法(EJMM)および4×4行列法(4×4法)の原理および問題点について検討を行った。EJMMにおいて、入射光(A_p, A_s)と透過光(T_p, T_s)との関係は光学異方性媒体のジョーンズ行列

\mathbf{M} を用いて(2-1)式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} T_p \\ T_s \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} A_p \\ A_s \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

EJMMでは、界面における光強度の減衰を考慮することはできるが、媒体内の干渉を含めることはできない。一方、4×4法では、マクスウェル方程式に基づき、電界成分および磁界成分の進行波と後進波を考慮する計算理論であり、その理論値には全ての媒体内の干渉が含まれる。

EJMMおよび4×4法により計算した理論値と実測値とを比較を行った結果、EJMMでは干渉による波の部分でずれが生じたが、分光能考慮4×4法ではほぼ一致したことから分光能考慮4×4法により正確な理論値を得ることができる。しかし、分光能考慮4×4法では多大な計算時間を必要とし、この計算法による光学シミュレーションは困難である。したがって、高速かつ正確に計算可能な計算理論を考案することが必要である。

簡便かつ高速なEJMMを発展させた、層毎の干渉計算の有無を選択可能かつ高速に計算可能な新2×2行列法について検討を行った結果、干渉を計算するためには、あらゆる界面における反射光および透過光について媒体内の位相変化を考慮しつつ、その足し合わせを行えばよいことを明らかにした。1層媒体における干渉を考慮した2×2行列 \mathbf{M} は、

$$\mathbf{M} = \mathbf{D}_{1,2} \mathbf{P}_1^+ \mathbf{D}_{0,1} + \mathbf{D}_{1,2} (\mathbf{P}_1^+ \mathbf{R}_{1,0} \mathbf{P}_1^- \mathbf{R}_{1,2}) \mathbf{P}_1^+ \mathbf{D}_{0,1} + \mathbf{D}_{1,2} (\mathbf{P}_1^+ \mathbf{R}_{1,0} \mathbf{P}_1^- \mathbf{R}_{1,2})^2 \mathbf{P}_1^+ \mathbf{D}_{0,1} + \dots = \mathbf{D}_{1,2} \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{P}_1^+ \mathbf{R}_{1,0} \mathbf{P}_1^- \mathbf{R}_{1,2})^k \mathbf{P}_1^+ \mathbf{D}_{0,1}, \quad (2-2)$$

と表せる。ここで \mathbf{P}_i^+ は*i*層における進行方向、後進方向の伝播行列、 $\mathbf{D}_{i,i\pm1}$ 、 $\mathbf{R}_{i,i\pm1}$ は*i*と*i*±1層間における透過ダイナミクス行列および反射ダイナミクス行列である。この計算法を延長することで、多層媒体内の干渉を考慮可能な行列および多層媒体において層毎の干渉計算の有無を選択可能な2×2行列を導出した。また、正確な干渉計算のために必要な近似のないダイナミクス行列および伝播行列の導出を行った。これらにより、層毎の干渉計算の有無を選択可能な光学異方性の新計算理論として干渉包含2×2行列 (Interference Embodiment 2×2 Matrix Method: IEM) 法を考案した。

IEM法と4×4法による計算値の比較を行った結果、両者は完全に一致したことから、IEM法の妥当性を確認した。また、IEM法を用いることで高速に計算可能であることを実証した。

第3章 エリプソメトリーを用いた液晶パラメータ測定のための新測定理論の確立

液晶セルの光学特性の理論値を計算する際、一般に、液晶パラメータを用い、弾性連続体理論に基づいて液晶の配向分布を計算する。この配向分布により、エリプソメトリーによる液晶パラメータ測定の際に液晶特有の問題が生じ、高精度なパラメータ測定が困難となる可能性がある。本章ではエリプソメトリーを用いた液晶パラメータ測定のための測定理論の確立について検討を行った。

従来のエリプソメトリーを用いた液晶の配向面に捻れがない液晶セルのパラメータを測定するための測定法では、入射面が配向面に平行な方位の光学特性が用いられていた。液晶セルを、セル内で配向が一様な均一配向セルおよびセル内で配向が面内で変化している厚さ面分布セルに大別する。均一配向セルでは、配向分布に関わるパラメータに光学特性が大きく影響を受けることから高精度な測定が可能であるが、厚さ面分布セルでは、異なる配向分布を持ったセルの光学特性が一致してしまい、高精度なパラメータ測定が困難となると考えられる。従来法を用

いた実測結果から、厚さ面分布セルのパラメータ測定が困難であることを確認した。したがって、厚さ面分布セルのパラメータ測定のための新測定理論の確立が必要である。

液晶セルの光学特性の理論解析を行い、新測定理論について検討を行った。平行方位において、各液晶層の方位の変化がないことから、光学特性は単純な各層の位相差の和でほぼ決定される。また、あるチルト角を有する二層の一軸性媒体とそれらとわずかに異なるチルト角を有する二層の一軸性媒体の配向面内角度特性がほぼ等しくなり得ることがわかった。これらの現象のため、平行方位を用いた高精度測定が困難であることを明らかにした。従来法の問題を改善するためには、各々の層の位相差の単純な和とならない光学特性を用いる必要がある。そのために、配向面に平行ではない方位を利用し、各々の層での見かけ上の液晶方位を変化させればよい。方位変化が最大となるのは垂直方位を用いた場合である。また、垂直方位を用いることで異なるチルト角を有する二層が等しい光学特性とはならないことを確認した。このことから垂直方位の光学特性を用いることで精度向上が可能である。

検討の結果、エリプソメトリーを利用した厚さ面分布セルのパラメータ測定のための新測定理論を考案した。測定系を図3-1に示す。入射面が配向面に対して垂直な方位を用い、液晶セルの光学特性を測定する。実測値と理論値との数値フィッティングから各種パラメータを算出する。本測定理論を配向面外

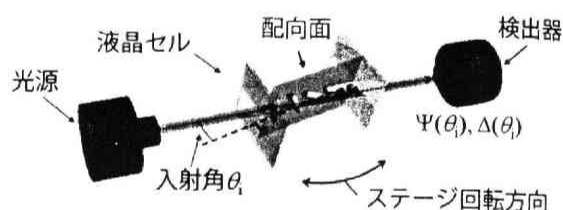


図3-1 PDOA法の測定系

振幅比位相差(Psi Delta Out of Alignment plane: PDOA)法と名付けた

実測結果から厚さ面分布セルのパラメータを高精度に測定可能であることを実証し、PDOA法の妥当性を確認した。

第4章 液晶材料パラメータおよび液晶デバイスパラメータの高精度測定法の確立

本研究では、様々なLCDに使用されている液晶配向の中で、VA-modeやECB-mode、OCB-modeとして広く実用化されている捻れのない配向に注目し、捻れのない液晶配向モードLCDの電気光学特性に関わるあらゆる液晶パラメータについて検討を行った。

(1) 液晶屈折率および均一配向セルのプレチルト角およびセル厚

解析結果から、干渉が生じる1つの入射角における波長-振幅比特性および3つの入射角における波長-リタデーション特性を測定し、実測値とIEM法による理論値とのフィッティングから屈折率 n_{\perp} 、 n_{\parallel} 、均一配向セルのプレチルト角 θ_p 、セル厚 d を決定できること、また、あらゆる液晶材料の n_{\perp} 、 n_{\parallel} を測定するための条件を明らかにした。図4-1に示す様々なセル厚における n_{\perp} 、 n_{\parallel} の実測結果から本測定法(多重干渉三入射(MITI)法)の妥当性を確認した。

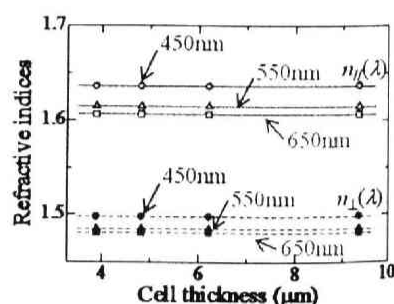


図4-1 様々なセル厚における n_{\perp} 、 n_{\parallel} の測定結果

(2) スプレィ配向セルのパラメータ

n_{\perp} 、 n_{\parallel} の高精度な値とIEM法およびPDOA法を用いることで、スプレィ配向セルのパラメータであるセル厚 d および表面チルト角 θ_0 を高精度に測定が可能であり、実測によりそのことを確認した。

(3) ハイブリッド配向セルのパラメータおよび垂直配向界面アンカリング強度

n_{\perp} 、 n_{\parallel} の高精度な値とIEM法およびPDOA法を用いることで、ハイブリッド配向セルのパラメータである表面チルト

角 θ_0 , θ_d 、セル厚 d 、弾性定数比 k を高精度に測定でき、また、それらの値を用いて垂直配向界面アンカリング強度 W_0/k_{11} を算出可能な方法(振幅比位相差ハイブリッド配向(PDH)法)を考案し、実測によりPDH法の妥当性を確認した。

(4) 弾性定数および誘電率

MITI法を用いることにより均一配向セルの d , θ_p を高精度に測定でき、この結果、岸本らが考案した配向膜容量考慮CVフィッティング法¹⁾を用いることにより、液晶の配向の規則性に関わる弾性定数 k_{11} , k_{33} 、電界の印加に対する応答に関わる誘電率 $\epsilon_{//}$, ϵ_{\perp} を高精度に測定可能である。

(5) 平行配向界面極角アンカリング強度および配向膜容量

これまでの成果により、 k_{11} , k_{33} , $\epsilon_{//}$, ϵ_{\perp} 、ホモジニアス配向セルの θ_p , d を高精度に測定できる。この結果、IEM法およびPDOA法を用い、電圧を印加したホモジニアス配向セルから平行配向界面極角アンカリング強度 W_0 および配向膜容量 C_a を測定する方法(電圧印加多入射(MAIV)法)を考案し、実測結果からMAIV法の妥当性を確認した。

(6) 粘性係数

これまでの成果により、 n_{\perp} , $n_{//}$, k_{11} , k_{33} , $\epsilon_{//}$, ϵ_{\perp} 、均一配向セルの d , θ_p , C_a , W_0 の高精度に測定できる。したがって、船津らによって提案された係数分離フィッティング(MVS)法²⁾を用いることにより、回転粘性係数 γ_1 およびMiesowicz粘性係数 η_1 , η_2 を高精度に測定可能である。

以上の本研究の成果の妥当性を実測結果から確認し、本研究で考案した測定法を用いることで高精度な液晶セルの光学シミュレーションが可能であることを示した。

第5章 結論

本研究の結果、以下のことを実証した。

- (1) 多層媒体において層毎に光学的干渉の計算の有無を選択可能な光学異方性の新計算理論として、IEM法を考案した。
- (2) エリプソメトリーを用いた液晶パラメータの新測定理論について検討を行った結果、厚さ方向に分布を有する液晶セルのパラメータを測定可能なPDOA法を考案した。
- (3) IEM法およびPDOA法に基づき、パラメータとして液晶屈折率、均一配向液晶セルのプレチルト角およびセル厚、スプレイ配向セルの表面チルト角およびセル厚、ハイブリッド配向セルの表面チルト角、セル厚、弾性定数比および垂直配向界面アンカリング強度、平行配向界面極角アンカリング強度および配向膜容量の新たな高精度測定法を考案した。

以上、本研究の成果により、光学計算における異方性媒体界面理論を構築し、液晶材料パラメータおよび液晶デバイスパラメータの評価の体系化を行い、精密なLCDの設計の基盤を確立した。

参考文献

- 1) T. Kishimoto, et al.: SID2008, P-255L (2008)
- 2) Y. Funatsu, et al.: IDW'03, LCT4-3 (2003)

論文審査結果の要旨

高性能な液晶デバイス(LCD)の光学シミュレーションには正確な液晶材料パラメータおよび液晶デバイスパラメータを求める必要がある。しかし、従来の測定法には種々の問題点が存在し高精度の測定が困難であった。本論文は、異方性媒体の正確な光学理論を確立すると共に、エリプソメトリーを用いて液晶材料パラメータおよびデバイスパラメータを高精度で測定する方法を明らかにしたものであり、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、拡張ジョーンズ行列法に干渉行列を導入することで、異方性媒体を含む多層の光学特性を求める干渉包含 2×2 行列法を導き、各層の干渉の有無を選択可能な新しい計算理論を確立している。また、これにより正確かつ高速に液晶セルの光学シミュレーションを行うことができることを実証している。この成果はLCDの光学シミュレーションを行う際に極めて有用である。

第3章では、エリプソメトリーを用いた液晶パラメータの測定理論について述べている。まず、配向面内における角度依存性を測定する従来の方法では、一様に配向した液晶セルにおける液晶パラメータの測定は可能であるが、厚さ方向で配向が変化するセルでは測定が困難であることを示している。また、このようなセルの場合には液晶配向面に対して垂直な方位で振幅比および位相差の角度依存性を測定すれば良いことを明らかにしている。これは液晶のパラメータ測定において重要な成果である。

第4章では、第2章で考案した計算理論および第3章で考案した測定理論を用い、LCDの電気光学特性に関わるあらゆる液晶材料パラメータおよびデバイスパラメータを高精度で測定する方法を体系化している。特に液晶の屈折率および表面配向力については従来の方法に比べて格段に高い精度が得られることを明らかにしている。これらの方法によって精密なLCDの光学設計とシミュレーションが実行可能となり、これによって高性能なLCDを実現できる可能性を明らかにしている。これらの成果は応用面からも高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、異方性媒体の正確な光学計算理論を構築し、液晶材料パラメータおよびデバイスパラメータの測定方法を確立すると共に、精密なLCDの設計を可能にしたものであり、電子工学および画像工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。